

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190262

胡文浩, 那书豪, 李学东, 李想, 宇振荣, 王文静, 段美春. 乡土野花组合在农业景观中的应用[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(12): 1846–1856

HU W H, NA S H, LI X D, LI X, YU Z R, WANG W J, DUAN M C. Application of native wildflower mixtures in agricultural landscapes[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(12): 1846–1856

乡土野花组合在农业景观中的应用*

胡文浩¹, 那书豪¹, 李学东¹, 李想¹, 宇振荣¹, 王文静³, 段美春^{2**}

(1. 中国农业大学资源与环境学院 北京 100193; 2. 西南大学农学与生物科技学院 重庆 400715; 3. 西湖大学生命科学学院 杭州 300124)

摘要: 乡土野花组合是筛选以乡土野花为主体的, 并通过混合播种建立群落的一种景观植被建植模式, 是欧美国家近年来较为流行的一种农业景观恢复与建设的技术措施。已有的研究发现乡土野花组合能够改善景观结构与生境质量, 吸引传粉生物和自然天敌, 从而起到增强农业景观的传粉及害虫控制功能, 并改善农作物品质、提高农作物产量; 与此同时, 乡土野花组合也具有较好的文化功能。乡土野花组合的设计对建植效果具有重要作用, 其物种筛选、配比、播种方式及布局是设计中需要主要解决的问题。本文在总结欧美国家乡土野花组合设计模式与生态监测结果的基础上, 提出乡土野花组合物种筛选的3原则: 乡土性、功能多样性与包含特定关键物种; 并对其生长周期、物种数、播量、播种面积与空间布局等技术细节进行了讨论, 以促进乡土野花组合的本土化、区域化发展。欧美国家提出了一系列推动产业发展及农户补贴的有关政策, 其中美国主要以推动基础研究与产业发展政策为主, 注重限制植物材料本土化; 欧洲国家通过多项立法及农业环境保护政策为农户提供多样化的生态补贴, 以促进农户充分参与乡土野花组合栽植过程。在我国, 尚缺乏成熟的乡土野花组合应用案例。中国的乡土野花组合需充分发掘种质资源并进行生态、栽培与景观特性评估, 以实现本土化的乡土野花组合。本文最后提出, 通过多学科合作实现乡土野花组合的设计与推广, 政府、产业、科研机构与农民共同参与乡土野花组合的设计过程, 并提出市场化的生态补贴政策, 以推动乡土野花组合在我国农业景观的应用, 为改善我国农业生态环境做出应有贡献。

关键词: 乡土植物; 野花; 生态系统服务功能; 传粉; 自然天敌; 害虫控制; 农业景观

中图分类号: Q968.1

文章编号: 2096-6237(2019)12-1846-11

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Application of native wildflower mixtures in agricultural landscapes*

HU Wenhao¹, NA Shuhao¹, LI Xuedong¹, LI Xiang¹, YU Zhenrong¹, WANG Wenjing³, DUAN Meichun^{2**}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. School of Life Sciences, Westlake University, Hangzhou 300124, China)

Abstract: The use of native wildflower mixtures, a kind of landscape vegetation planting method that mainly selects native wildflowers and establishes communities via mixed sowing, has become a popular technical measure for agricultural landscape restoration in Europe, America, and elsewhere in recent years. Studies have reported that native wildflower mixtures can

* 农业农村部项目(091721109022291004)资助

** 通信作者: 段美春, 主要研究方向为农业景观生物多样性的保护与利用。E-mail: duanmc@swu.edu.cn

胡文浩, 主要研究方向为景观生态学与生物多样性保护。E-mail: huwenhao@cau.edu.cn

收稿日期: 2019-06-23 接受日期: 2019-09-18

* This study was supported by the Research Project of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China (091721109022291004).

** Corresponding author, E-mail: duanmc@swu.edu.cn

Received Jun. 23, 2019; accepted Sep. 18, 2019

improve habitat quality and landscape structure, attract pollinators and natural enemies, and enhance pollination and pest control functions in agricultural landscapes. Moreover, researchers have found that the combination of native wildflowers is an important method for landscape construction. The design of native wildflower mixtures plays an important role in the establishment of planting; therefore, the selections of species, their proportion, and sowing method and layout are important issues that ought to be resolved in the design. Based on a summary of European and American experiences of designing of native wildflower mixtures and biodiversity monitoring, we observed that the nativization, diverse functions, and inclusion of key species play important roles in plant selection. Further, we discussed the detailed techniques for the design, such as the growth cycle, species and seeding quantity, seeding area, and spatial layout, to promote the localization of native wildflower development. Native wildflower mixtures are an important technology for achieving agricultural landscape restoration. In European and American countries, a series of relevant policies have been proposed to promote industrial development and farmers' subsidies. In European countries, numerous legislative and agricultural environmental protection policies have been established to provide farmers with various ecological subsidies to promote their complete participation in the process of local wildflower combination planting. However, in China, there is a lack of cases in which mature local wildflower combinations have been applied. Therefore, it is necessary to completely explore the germplasm resources and evaluate the ecological, cultivation, and landscape characteristics of native wildflower combinations in China to achieve native wildflower combinations. To this end, the present study proposes the realization of the design and promotion of rural wildflower combinations via multidisciplinary cooperation. The government, companies, research institutions, and farmers should all participate in the process of designing rural wildflower combinations and propose market-oriented ecological subsidy policies to promote the same. The application of native wildflower combinations in the field of agricultural landscape restoration could contribute to improving the agricultural ecology in China.

Keywords: Native plant; Wildflower; Ecosystem service function; Pollination; Natural enemies; Pest control; Agricultural landscape

近年来, 农业集约化的发展以及单一农作物种植面积比例不断扩大^[1], 导致农业景观单一化, 农业生态系统多样性和结构复杂性降低, 生境破碎化等生态问题, 这些问题已被证实是生物多样性和相关生态系统服务功能下降的主要原因之一。农田中传粉生物及自然天敌为代表的有益生物的丰富度和多样性在近年来逐步减少, 及其导致的农田病虫害现象加剧, 传粉服务功能减少, 农作物产量与品质受到严重影响, 已成为近年来农业生态系统面临的重要问题^[2-4]。在尽可能维持现有种植结构和作物生产力的基础上, 如何提高农田生物多样性并恢复生态系统服务功能, 引起了人们的广泛兴趣^[5-7]。近年来的研究表明, 在农业景观中恢复生态系统服务功能的关键, 除发展有机农业、实施间套作等传统措施外, 一方面还需要完善农田景观结构, 促进生境异质性^[8]; 另一方面则需要营造农田有益昆虫所适应的生境和植被结构, 完善植物多样性, 为农田生物提供所需要的生态资源^[9-10]。

20 世纪 90 年代初期, 瑞士、德国等国的农民自发在农田边缘及残存生境中播撒当地的野花种子, 用来补充农田中的花卉资源, 解决农业集约化造成的传粉昆虫不足的问题, 取得了良好效果^[11]。这些乡土的野花为昆虫提供了越冬栖息地以及花蜜与花粉等食物, 并使得这些昆虫免于人类干扰, 并以此

为基础提供了多项服务。从景观角度来看, 这种小块生境增加了区域的连通性, 完善了区域的景观结构, 促进了生物的交流, 进一步提升了区域的生态系统服务功能^[12]。经过若干年的研究与实践, 经过科学设计与配比, 这种做法逐渐演变成固定的野花组合模式, 体现出良好的生态与经济效益, 得到了各国政府的充分重视。近年来, 在农业景观中种植乡土野花组合, 已经成为欧美各国进行景观生态修复的重要推荐措施。

在中国, 广大乡村地区经历了大规模的农业现代化建设, 一方面, 农业集约化与土地利用方式的改变已经对农业生态环境和景观产生了重大影响; 另一方面, 种植结构的改变与对农作物产量品质需求大大提升。这就要求我们在区域及景观尺度上修复农业景观, 并提升农业生态系统服务功能^[13-15]。欧美国家的经验表明, 乡土野花组合是解决这一问题的方法与途径之一。本文通过介绍乡土野花组合的生态系统服务功能, 并从工程与政策角度介绍乡土野花组合的设计与构建方法, 希望能为乡土野花组合在国内的研究与推广提供参考。

1 乡土野花组合的生态系统服务功能

1.1 传粉生物多样性保护与功能恢复

传粉是现代农业、尤其是传粉依赖型农业生产

和发展的重要保障^[16]。传粉功能依赖多样化的传粉生物群落。调查显示,农田中约 25%的传粉生物是蜂类^[17],其余部分还包括蝶类、寄生蜂类、食蚜蝇类等。这部分生物的传粉功能很难仅通过人工传粉及补充蜂源得以弥补。因此,仍然需要通过修复生境的手段,修复并补充自然传粉群落。

提高传粉功能,不仅需要提升区域内传粉生物群落的丰富度及规模,还需要增加传粉生物对农田的访花频率。乡土野花组合最早出现,正是应对传粉功能不足这一问题。在这方面,欧美国家进行了大量的研究,基本证实了乡土野花组合对传粉功能提升的重要作用^[18]。以英国为例,英国种植以豆科(Leguminosae)植物为主的乡土野花组合,有效提升了农田边缘野生熊蜂的多度,特别是部分稀有熊蜂物种的数量,监测显示,熊蜂群落倾向于在具有乡土野花组合的区域建立稳定群落^[19];在苏格兰的研究显示,乡土野花组合能够提升 25%的传粉者的访花频率,还改变了传粉生物的群落构成,增加了熊蜂在传粉生物群落中的比例,从而进一步提升了传粉的效率及质量^[20]。

1.2 自然天敌生物多样性保护与害虫控制

乡土野花组合可以为自然天敌提供结构资源和未受干扰的栖息地,并提供额外的食物来源,因此可以支持天敌种群的长期生存^[21-22]。试验证明,无论是针对以寄生蜂类为代表的寄生性自然天敌,还是以步甲、蜘蛛为代表的捕食性自然天敌,乡土野花组合都能对其群落发展产生正面效益,并降低所在区域害虫数量,从而加强所在区域的害虫控制功能。

一项在荷兰的研究显示,对寄生者而言,野花组合营造的生境能够增加农田附近茧蜂的数量,并提升其对蚜虫的寄生率,从而起到控制蚜虫密度的效果^[23]。野花组合对捕食者也有类似的作用。一项瑞士的定位研究显示,在麦田边缘种植乡土野花组合,可以有效提升麦田中蟹蛛科(Thomisidae)、平腹蛛科(Gnaphosidae)、狼蛛科(Lycosidae)和园蛛科幼体(Araneidae)等蜘蛛的密度;同时,狼蛛科蜘蛛的密度也从农田内部向野花带边缘增加^[24]。

目前乡土野花组合针对蚜虫、鳞翅目害虫等能够起到较好的防控效果^[25],但是对广谱食性、活动范围较大的部分害虫[如牧草盲椿(*Lygus lineolaris*)]防控效果不佳^[21]。造成这种情况的原因是多方面的,与害虫的活动习性、趋势范围,乡土野花组合的栽植方式及当地的自然天敌情况等均有一定的关系。此外,

如果实施区域附近原本自然天敌群落就过少甚至没有,也会影响野花组合的害虫控制效果。因此,在利用乡土野花组合进行害虫控制时,要对所在区域害虫与自然天敌的数量及分布、活动及取食习性、生态习性等进行调查分析,并在调查基础上制定适当的、个性化的种植方案,并结合其他生态措施共同增加自然天敌数量,实现害虫自然控制的目的。

1.3 农作物产量品质提升

农作物产量与品质提升是多个生态功能与生态过程共同作用的结果。增强农田害虫控制能力、提升传粉功能效益,均对农作物产量与品质提升有正面影响。但是这一过程往往需要乡土野花组合的多年种植,种植时间越长,潜在的生态效益越好。

对传统作物而言,乡土野花组合具备提升传统作物产量的潜力。一项基于冬小麦(*Triticum aestivum*)的研究显示,周边存在野花带的田块,冬小麦的平均产量增加 10%^[26]。而对传粉依赖性作物而言,种植乡土野花组合,特别是长期种植乡土野花组合,可以显著提升果实品质,且随着种植时间的增加,效益也逐步提升。一项针对蓝莓(*Vaccinium* spp.)田周边种植野花组合的研究显示,种植野花组合 4 年后,单果重量由原来的 0.47 g 提升至 0.64 g,且其总产量提升约 25%。从经济角度来看,乡土野花组合带来的持续收益要高于投入的成本^[27]。

1.4 大众感知与经济价值

乡土野花一直以来都是人类认知及了解自然的一个重要窗口。从景观效果及美学效果讲,乡土野花是人类最易接触到的自然特征之一,寄托了人类对自然的认知,是人类了解自然生态系统的的一个重要纽带。在长期的演变中,乡土野花被赋予了除自然属性之外的文化属性,在东西方均诞生了以花神为代表的民间信仰,这也可以被看作是乡土野花文化标记的集中体现^[28]。从研究角度来看,以英国邱园为代表的欧洲植物园大量收集并培育了当地的乡土野花资源,自此,利用乡土野花成为欧洲重要的园艺传统^[29];我国同样有悠久的野花驯养历史,与此同时,很多乡土野花同时可以作为中草药被大量应用于医药学领域,仅在坝上地区,就有如金莲花(*Trollius chinensis*)、乌头(*Aconitum carmichaelii*)、柴胡(*Rhodiola bupleuroides*)、秦艽(*Gentiana macrophylla*)、独活(*Heracleum hemsleyanum*)、瞿麦(*Dianthus superbus*)等多种乡土野花被开发成重要的中草药资源^[30-31]。因此,乡土野花不仅是重要的文

化标记,也和人类发展息息相关。

鉴于乡土野花在人类历史上的独特作用与文化脉络,相较于商业花卉,大众对乡土野花具有更强的偏好性。一项针对于北京市乡土野花组合的大众调查显示,大众对目前城镇绿地结构不满意,并期望在公园、住宅区、附属绿地、路边以及乡村地区见到更多的乡土野花组合;在美国,一项针对大学生的调查显示,大众倾向于购买乡土野花的种子以及成品植物,并展示出在不同环境中保护和利用乡土野花的兴趣^[32]。从经济效益的角度来看,人们对于乡土野花的支付购买意愿甚至可以达到非乡土野花的 2.89~4.74 倍^[33]。这也就说明,使用乡土野花不但能促进大众感知,增进文化功能,还能提供良好的经济效益。

2 乡土野花组合的建植设计策略

乡土野花组合的建植设计决定了组合效果及市场前景,且研究周期较长。欧美国家在具有较好研

究基础上,开发一个乡土野花组合也需要 3~5 年。乡土野花组合构建规模通常较小,需要在小面积上实现尽可能高的生态效益,就需要充分评估其生态原理,并在原有基础上提升,因此设计目标是在近自然修复基础上的功能强化。其中,物种的来源、筛选、配比、布局、栽植与后期管护等问题,是乡土野花建植过程中主要需要解决的问题。

2.1 乡土性原则

乡土野花组合的乡土性是设计的首要原则。在设计中,应尽可能以建植区域的乡土物种为主,避免片面追求景观效果,使用波斯菊(*Cosmos bipinnata*)一类具有入侵性的外来及商业花卉(见表 1)。乡土野花相对外来野花传粉效益更好,美国的监测结果表明,以外来野花组合作为对照组,新建立的乡土野花带的本土传粉昆虫访花频率是对照组的接近 2 倍,而维持 10 年以上的乡土野花带可以达到 6 倍^[34-35];而外来花卉的入侵性存在较多负面影响:1)缺乏文化属性,不容易营造具有地域特色与文化深度的景观

表 1 国内野外造景主要应用的外来商业花卉及其入侵性

Table 1 Exotic commercial flowers mainly used in field landscape design and their invasive evaluation in China

序号 Number	入侵性评价 Invasive evaluation	科 Family	属 Genus	种 Species
1	外来入侵植物 Invasive alien plant	菊科 Compositae	金鸡菊属 <i>Coreopsis</i>	金鸡菊 <i>Coreopsis drummondii</i>
2			百日菊属 <i>Zinnia</i>	百日菊 <i>Zinnia elegans</i>
3			矢车菊属 <i>Centaurea</i>	矢车菊 <i>Centaurea cyanus</i>
4			秋英属 <i>Cosmos</i>	秋英(波斯菊) <i>Cosmos bipinnata</i>
5				黄秋英(硫华菊) <i>Cosmos sulphureus</i>
6			天人菊属 <i>Gaillardia</i>	天人菊(宿根天人菊) <i>Gaillardia pulchella</i>
7			滨菊属 <i>Leucanthemum</i>	滨菊(西洋滨菊) <i>Leucanthemum vulgare</i>
8			松果菊属 <i>Echinacea</i>	松果菊 <i>Echinacea purpurea</i>
9			金光菊属 <i>Rudbeckia</i>	金光菊 <i>Rudbeckia laciniata</i>
10				黑心金光菊(黑心菊) <i>Rudbeckia hirta</i>
11			万寿菊属 <i>Tagetes</i>	孔雀草 <i>Tagetes patula</i>
12			蛇目菊属 <i>Sanvitalia</i>	蛇目菊 <i>Sanvitalia procumbens</i>
13		柳叶菜科 Onagraceae	月见草属 <i>Oenothera</i>	月见草 <i>Oenothera biennis</i>
14		马鞭草科 Verbenaceae	马鞭草属 <i>Verbena</i>	马鞭草 <i>Verbena officinalis</i>
15		石竹科 Caryophyllaceae	石头花属 <i>Gypsophila</i>	圆锥石头花(满天星) <i>Gypsophila paniculata</i>
16			麦仙翁属 <i>Agrostemma</i>	麦仙翁 <i>Agrostemma githago</i>
17	具备入侵潜力的外来植物 Exotic plants with potential for invasion	罂粟科 Papaveraceae	华菱草属 <i>Cosmos</i>	花菱草 <i>Cosmos sulphureus</i>
18			罂粟属 <i>Papaver</i>	虞美人 <i>Papaver rhoeas</i>
19		石竹科 Caryophyllaceae	石竹属 <i>Dianthus</i>	须苞石竹(五彩石竹) <i>Dianthus barbatus</i>
20	乡土野花 Native wildflower	十字花科 Brassicaceae	诸葛菜属 <i>Orychophragmus</i>	诸葛菜 <i>Orychophragmus violaceus</i>
21		石竹科 Caryophyllaceae	石竹属 <i>Dianthus</i>	石竹(中国石竹) <i>Dianthus chinensis</i>

数据来源:作者调研获得。入侵性判定依据:根据中国入侵植物数据库(<http://www.chinaias.cn/wjPart/SpeciesSearch.aspx?speciesType=3>)及《中国入侵植物名录》^[36]综合判断。Data are obtained by author research. Invasive plants are according to the Chinese Invasion Plants Database (<http://www.chinaias.cn/wjPart/SpeciesSearch.aspx?speciesType=3>) and Directory of Invasive Plants in China^[37].

效果; 2)花期集中, 花型花色单一, 造景效果时间短, 缺乏长期的景观效益; 3)具备一定的化感作用, 阻碍其他花卉发芽及生长; 4)可能导致形成野外及农田扩散, 对农业生产及生态环境产生负面影响; 5)生态效益不佳, 对传粉生物的访花行为存在显著的负面影响^[34]。

乡土野花组合要求以乡土植物为主, 一些具有良好生态效果、且不具备入侵性的高自然价值驯化种, 则应充分评估其生态效果与入侵性等情况后, 结合其实际效果纳入乡土野花组合中。因此, 基于国内不同区域现状以及欧美国家通行方案作用机理及特点, 进行乡土野花组合的乡土化尝试就显得十分重要。韩国及日本在这方面则进行了一些探索性的尝试, 例如在韩国的一项试验表明, 由 70%乡土野花及 30%高自然价值引入野花共同构成的乡土野花组合, 其种植及景观效果较好^[37]。

2.2 功能多样性原则

在物种筛选中, 应尽可能包含不同的花期、花色、高度、花朵形态等功能要素, 功能多样性是维持害控及传粉功能的重要驱动力^[38]。以传粉生物为例, 不同的传粉生物具有不同的生理结构和生态习性, 只有当野花组合所对应生物群落的习性相契合时, 才能体现出良好的生态修复作用。例如花朵结构能够影响传粉生物的取食形式, 进而影响传粉生物的偏好。同时可以进行传粉与害虫寄生的寡节小蜂(*Edovum puttleri*)在取食花蜜时只能够取食雄蕊完全暴露的花朵, 而瓢虫柄腹姬小蜂(*Pediobius foveolatus*)则对花蜜结构要求不严格。在设计中为保证生态效益, 欧洲的研究人员主张在乡土野花组合中应纳入茴香(*Foeniculum vulgare*)等伞形科花卉, 以方便其取食^[39]; 从花卉颜色及大小的角度来看, 熊蜂对白色、红色等色花朵不敏感, 采用这类颜色为单一色调的野花组合会显著增加熊蜂的觅食搜寻时间, 降低传粉效率。同理, 如乡土野花组合中存在大型花卉, 则会显著降低熊蜂对大型花卉目标搜寻时间, 增加熊蜂的传粉效率^[40-42]。

在设计中突出功能多样性的主要目的, 就是通过丰富植物功能多样性来满足多种不同有益昆虫的不同需求, 使之作为一个整体, 能够对多种有益昆虫具有吸引力, 从而促进有益昆虫的生物多样性, 有助于提高资源利用效率, 提高生态系统服务功能。

2.3 包含特定关键物种

部分昆虫存在特定的寄主植物。例如北美重要的濒危动物帝王蝶(*Danaus plexippus*)需要在马利筋

(*Asclepias curassavica*)上才能产卵繁殖, 因此美国伯德·约翰逊野花中心推动在野花组合中加入马利筋, 为帝王蝶提供合适的生境^[43-44]。此外, 有研究显示有部分特定种对稀有的传粉生物有重要作用, 在实践中也需要将这些特定关键物种纳入野花组合中^[41]。需要引起注意的是, 特定关键物种的定义具有区域性, 不同区域的特定关键物种不同, 需要结合区域生物多样性的监测结果来逐步筛选关键物种。

2.4 生长周期及花期设计

如前文所述, 乡土野花组合在所在区域建立的时间越长, 所发挥的多元化生态效益越明显, 因此在设计乡土野花组合的生长周期时, 必须考虑到乡土野花组合的持续时间问题。当前, 不同乡土野花组合的生长周期主要分为两类, 一类是以多年生为主, 辅以一年生野花, 建植时间相对较长, 但是景观效果能够保持较长时间, 通常可以保留 2~6 年; 一类是以一年生野花为主, 演替很快, 通常景观效果只能保留 1~2 年。多年生野花组合生态效果较好^[45], 建植的边际成本也相对较低, 因而更受到农民青睐。但从欧洲的种植监测来看, 经过多年后野花组合同样会逐步发生演替, 其生态效益会逐渐降低, 此时则需要人为干预。尽管乡土野花组合具有一定的自播能力, 但在后期维护上, 往往需要通过针对性补充种子的手段来保证其景观效果^[46]。最新的研究表明, 在保留足够面积“安全岛”的基础上, 以两年为周期对野花带进行交替刈割, 可以有效增进开花植物的多度、丰富度及多样性指标, 从而进一步维护生态系统服务功能, 并提供部分牧草资源^[47]。

花期是乡土野花组合生长周期的重要参数, 在设计建植中既要充分考虑维持花期的连续性, 也要考虑花期持续的时间。当野花组合能够在整个生长季节为传粉生物类群提供持续的食物来源, 尤其是在早春等时间段(如 4—5 月)为刚刚结束冬眠期的野生传粉生物提供蜜源和栖息地, 有利于野生传粉生物在建植区域形成固定的群落, 并在未来较长时间内发挥生态效益^[48]。此外, 保持较长的花期和植被结构, 对蜘蛛、步甲等自然天敌越冬也有积极作用, 能够显著降低因越冬损失的农田自然天敌数目^[49]。为保证持续花期, 需要结合种质资源和栽培条件下的生长参数, 保证在不同时间段内均有开放的野花; 为保证早期花期, 可以适当改变栽植方式, 例如采用春化法、改春播为顶凌播和秋播等, 同时在秋季尽可能保证残茬过冬, 不要对栽植区域施加过多人为干扰, 有利于保证早期花期、花期的持久性, 并延

长野乡土野花组合的生长周期。

2.5 物种数及播量设计

高物种多样性是实现高功能多样性的基础, 有研究显示高植物多样性的乡土野花组合能够更好地发挥其多元化的农业生态系统服务功能^[50], 因此在欧美国家的乡土野花组合中, 往往拥有很高的物种丰富度, 有的较为成熟的组合甚至包含 20 余种野花^[51]。从实践角度来看, 除在初期设计中保留较高的物种数外, 还需要考虑不同物种间的竞争共生关系问题。例如, 部分入侵植物生长速度过快, 且存在化感作用, 抑制其他植物种子发芽, 造成野花组合种植效果不佳的问题。解决这一问题, 需要综合多个学科的研究成果。对这一问题的研究相对较少, 但从实践角度来看, 以下办法可能对解决这一问题有帮助: 1) 避免应用具有明确化感作用的植物和入侵植物; 2) 对不同野花的生长参数进行测定; 3) 适当降低单位面积播种量; 4) 改进乡土野花组合的研发流程, 通过设定基底的野花组合, 并逐步添加新种来逐步提升野花组合的植物多样性; 5) 参考自然条件下乡土野花群落的分布特征及群落结构。值得一提的是, 我国有学者学习英国及瑞士的野花组合的构建技术, 基于自然条件下的天然草甸植被群落结构对野花组合进行模拟, 取得了很多有益的经验 and 启示^[52]。

乡土野花组合的单位面积播种量通常不高, 一般在 $2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右, 很少高于 $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[53]。这和乡土野花种子颗粒普遍较小有关。提高播种量可能压缩不同野花的生长空间, 并加剧竞争, 抑制出芽率, 影响建植效果。此外, 在设计不同野花物种的播种比例时, 除了需要注意该种乡土野花的单播推荐播种量, 同时也要考虑最终长成后的规模大小, 要适当降低高大植物的播种量, 以降低竞争, 促进多种乡土野花生长, 形成高物种丰富度的野花群落。

2.6 播种面积及空间布局

在欧美国家, 乡土野花组合的播种通常需要占用部分耕地。尽管有研究显示占用 3% 和 8% 的耕地用于种植乡土野花组合不会影响农作物的最终产量, 并带来丰富的生态系统服务功能收益^[54]。但充分考虑不同占用面积带来的收益和潜在经济成本, 对设计者而言, 优化种植方案, 降低成本增加收益仍然非常重要, 因此需要进一步讨论乡土野花组合的播种面积与空间布局问题。不同国家对半自然生境的要求及面积比例受地形、耕作方式等多种因素影响, 因而不尽相同, 瑞士的农业景观中半自然生境大约占用 14% 的面积, 其中野花带的面积占用一半, 约

占总面积的 7%^[55]。乡土野花的播种面积变化有一个逐渐攀升至平稳的动态过程, 要充分考虑到农民在接受程度、经济要素、政策条件等多种因素, 因此在设计时可以保持一个相对灵活的比例。

乡土野花组合的空间布局同对应生物的活动与迁移规律有关。以自然天敌中的寄生蜂类为例, 对与农田边界的野花带保持不同距离的样地进行生物多样性监测, 但是寄生的虫卵数量会随着距离的不断增加而显著降低^[12]。因此为了保证效果, 需要确保野花带彼此之间间隔有限距离; 在考虑空间布局时, 应以促进生态过程, 减少常规耕地占用, 降低经济及人力成本为设计原则。

最常见的空间布局模式是在农田边缘带状种植野花组合, 这种形式被称为野花带或野花缓冲带(如图 1a), 对于小型地块, 宽度可以设置在 2~3 m, 对于大型集约型农用地块, 宽度则需要进行相应提升^[56]。这种形式通常适用于密集型农业产业, 例如小麦、卷心菜 (*Brassica oleracea*) 等种植, 而对于豌豆 (*Pisum sativum*) 等占地面积不大的作物而言, 则可以采用逐行种植的模式, 在不影响产量的情况下进一步增进其生态效益(如图 1b)^[23]。

有研究显示, 较大的野花播种面积可以在更大尺度上支持生态系统服务功能^[22,57], 因此, 近年来的实践和研究强调在栽种模式上保持一定的灵活性, 以充分发挥乡土野花组合的生态效益。除了利用乡土野花组合带状种植, 形成野花缓冲带以外, 在实践中也可以根据地形、环境等, 在农田的残存斑块、草地、弃耕地等地因地制宜, 设计野花斑块。近年来, 在农业景观中的林地、草地广泛撒播野花种子的做法逐渐兴起, 亦可以作为乡土野花组合的新兴应用形式^[58-59]。

3 乡土野花组合的相关政策

在推广乡土野花组合方面, 欧美各国政府做出了大量实践, 并逐步形成政策体系。纵观各国政策, 均主要包含产业推广与政策补贴两个相对主要的方面。值得一提的是, 各国在政策制定方面各有侧重, 例如美国主要强调乡土植物的概念, 注重产业及基础研究, 而欧洲则更多通过财政补贴的形式对农业景观中构建半自然生境给予一定的财政支持。欧美各国的相关政策均多以导则及技术文件的方式给出, 在执行上结合具体情境, 保留了一定的弹性, 充分尊重农民意愿, 且兼顾基础研究与产业开发, 因此推广效果较好。

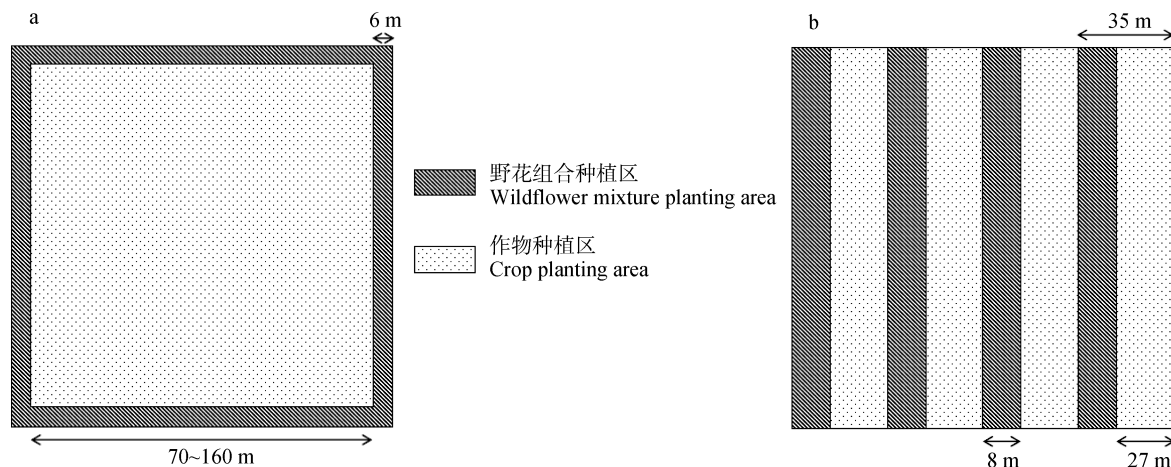


图 1 两种不同的乡土野花缓冲带构建空间模式

Fig. 1 Two spatial patterns of wildflower strips in farmland

a: 农田边界带状种植形式(改绘自 Ganser 等, 2018)^[56]; b: 逐行带状种植形式(改绘自 Hatt 等, 2017)^[23]. a: wildflower strips along farmland boundaries (draw from Ganser et al., 2018)^[56]; b: linear wildflower strips in farmland (draw from Hatt et al., 2017)^[23].

3.1 美国的基础研究及产业开发政策

在美国, 乡土野花及组合的研究与推广主要由美国农业部森林服务局以及美国内政部土地管理局共同承担, 美国渔业及野生动物管理局及美国国家公园管理局也会参与特定项目, 各州也有对应机构从事相关政策制定与推动, 形成了多部门共同参与, 共同治理的政策体系。美国乡土野花的应用最早开端于矿区修复及火灾损毁土地植被重建, 此后在约翰逊夫人的推动下, 逐步应用于城镇绿化及其他修复领域^[60-61]。

美国对乡土植物重视程度很高, 认为乡土植物十分契合美国本土的生态理念, 并制定了国家乡土植物材料战略(native plant material policy), 对生态修复中应用外来植物做出明确规定和限制, 要求在非极特殊情况下(例如应用本土植物无法建植), 在生态修复与建设中不得使用外来植物材料^[62-63]; 此外, 该政策还对乡土植物的种质资源开发保护以及相关产业的人才培养等具体方面做出非常具体的指导。美国对乡土野花组合采取项目导向性政策, 鼓励成立专门的非政府研究机构从事相关推广服务职能[如伯德约翰逊夫人野花中心(原美国国立野花中心)等]。在生态系统服务功能导向的项目框架中(例如美国的国家种子战略、植物传粉战略、传粉友好型管理政策等)将乡土野花作为综合性实施框架中的一部分, 对乡土野花组合进行应用^[64]。近年来, 美国对乡土野花组合这一新兴事物关注度较高, 凭借较好的植物材料与设计基础, 取得了大量成绩, 尤其是乡土野花组合结合蓝莓产业, 显著提升了蓝莓的品质和农民的经济收益。此外, 美国的部分州

(如蒙大拿州)则进一步鼓励农民通过零售野花带种子来实现更多收益, 这一项收入就可以抵消包含人力成本在内的乡土野花的各项经济开支, 并实现盈利^[65]。

3.2 欧洲的法规立法及生态补贴政策

欧洲对乡土野花组合的推动主要通过法规立法及政策型生态补贴实现乡土野花组合的生态效益。其中影响及规模最大的是欧盟推出的 Natura 2000 计划^[66]以及欧盟共同农业政策(common agricultural policy, CAP)。Natura 2000 计划是欧洲综合性的环境保护计划, 提出了多项生物多样性保护、生态系统服务功能提升的目标和愿景, 推动欧洲各国在农田生态与景观建设提供支持。CAP 计划的核心是价格支持, 由一系列政策及生态补贴共同构成。为达到环境友好农业的目的, 欧盟制定了相应的措施——农业环境项目(agri-environmental programme, AEP)来引导农民的决定和生产方式, 其农业生态环境政策包括了乡村景观的保护、维持和强化。其中明确提出, 要在农田周围和边界创造缓冲带和甲虫栖息地, 创造不同类型的生境区域, 在农村范围内建设生物保护核心区 and 生物廊道, 增加区域景观乡土性, 降低区域景观破碎度等措施^[67], 这些措施均需要应用乡土野花组合。

中欧、西欧及北欧是欧洲乡土野花组合的主要推动者。部分国家对乡土野花组合的利用进行了立法, 确定农田中必须有一定的面积作为“生态补偿区”。例如, 瑞士政府最早规定瑞士农民有义务至少将 7% 的农业用地作为“生态补偿区”(ecological compensation area, ECA), 其中, 乡土野花组合占到

其中 20% 的比例, 而时至今日, 生态补偿区和其中乡土野花组合在补偿区的占比已经分别提高到 14% 和 50%^[68-69]。而奥地利则将播种乡土野花带作为第 2 个奥地利发展计划中的众多环境措施之一, 农民有义务在 2% 的耕地上建设野花条带, 并建议每年进行刈割^[70]。尽管在北欧地区, 生态环境保护的重点在于湿地、草原等自然生境保护, 但是芬兰、瑞典等国也分别开始逐步鼓励农民在特定地区播撒乡土野花组合的种子(如水道缓冲带等), 而芬兰还特别制定了一项鼓励景观异质性的保护政策, 鼓励沿农田边缘播种乡土野花条带^[71]。

英国政府则推动了一个面向所有农民、土地管理者和承租者的环境管护项目(environmental stewardship, ES), 由 Natural England 进行技术指导、补助发放等相关工作, 农民可根据自身情况选择是否加入, 及加入的不同层级。随管理水平的不同, 这一政策包含 4 个层级, 分别为 ELS(entry level stewardship, 入门管理)、OELS(organic entry level stewardship, 有机入门管理)、HLS(higher level stewardship, 较高水平的管理)和 UELS/UOELS(upland entry level stewardship, 高地的管理)^[72]。在这项政策中, ELS 及 OELS 层级中的 E 选择(缓冲带)、F 选择(耕地与轮作农田)具有种植乡土野花缓冲带的选项, 并根据种植规模可以申请每公顷 400~600 英镑可叠加的生态补助, 足以补助农民的栽植开支。此外如申请高级环境管护技术, 则可以通过草地缓冲带的植物强化建设、物种丰富的半自然草地的维护、外来入侵植物物种的控制、边坡地的恢复等项目进一步申请补贴^[73]。

4 乡土野花组合发展对我国的启示

当前, “山水林田湖生命共同体”的理念为农业环境的保护与生态功能提升提出了系统的指导思想, 要求我们关注生态过程与生态系统服务功能, 加强农业景观修复建设, 提高农田生态系统弹性^[74]。欧美国家乡土野花组合的建设为我国的农业景观修复提供了新的方法与思路。应进一步加强对乡土野花组合开发利用关键步骤和关键技术, 开发具有区域性特色的乡土野花组合。

尽管欧美国家已有较为成熟的乡土野花开发方案, 且国内也有利用商业花卉种子混播形成的类野花组合景观, 但建立中国特有的乡土野花开发体系, 开发具有本土化的乡土野花组合政策、设计与应用方案仍然是未来的主要发展方向。乡土野花的概念具有地域性和区域性, 欧美国家的乡土野花在中国

直接应用则有可能会产生入侵性, 且其生态效果需要验证, 需谨慎使用商业花卉种子。乡土野花的开发目标是通过形成完整的政策推动、公众参与、产业发展、科研推广的体系, 致力于开发生态效益显著、栽植方法简单、景观效益良好、富有地域特色的乡土野花组合。为了进一步达成这一目标, 需要政府、相关产业机构、科研院所、公众机构共同参与。为进一步建设乡土野花组合的研发、生产及推广体系, 突出乡土野花组合的区域性、生态性与功能性, 以下工作仍然需要各方进行推动:

4.1 拓展乡土野花种质资源

结合各地植物区系的调查, 了解各地乡土野花的名称及不同生境中植物群落的主要构成; 此外, 需要结合现有种质资源及商业化育种现状, 逐步开发新的乡土野花的繁育体系。在我国, 有大量乡土野花是重要的中药资源, 在药用植物领域已经完成了商业化的育种及栽培流程, 生产技术非常成熟。以华北地区为例, 金莲花(*Trollius chinensis*)、乌头(*Aconitum carmichaelii*)、瞿麦(*Dianthus superbus*)、短毛独活(*Heracleum moellendorffii*)、野罂粟(*Papaver nudicaule*)等, 既具有良好的景观效益, 也具有良好的文化属性和生态效益潜力, 是乡土野花组合应用的重要候选物种^[75-77]。

4.2 物种生态效益评估以推动乡土野花组合的广泛应用

生态工程及生态设计中要充分评估各种植物材料特性。尤其是生态敏感区、生态脆弱区以及生态修复建设中, 需要限制外来植物材料的使用。为进一步进行物种筛选与搭配, 需要对不同乡土野花及部分高自然价值的驯化物种的生长特性(如发芽率、株高、花期、花色、生长周期等)、生态特性(如对传粉生物的吸引力、对自然天敌的吸引力)、景观特性(如文化特性、成景效果、公众接受程度等)进行评估, 以确定每种利用与配置方式。此外, 进行生态评估有助于发掘乡土野花的新的生态系统服务功能, 从而延伸乡土野花组合的应用场景, 对乡土野花组合的推广起到促进作用。

4.3 多元主体参与设计乡土野花组合的研发需要各方参与

农民是乡土野花组合的直接实践者, 也是乡土野花生态效益的直接受益者, 对乡土野花组合具有直接的发言权。在欧美各国的研究流程中, 需要进行充分的参与式设计和讨论, 将有关利益各方集合到规划与设计过程中。这种沟通式的规划方法(communucative planning)在欧美国家中已经非常流

行, 有成熟的参与流程和大量的成功案例, 实践证明, 这种方式有助于发现问题、提高研发效率, 更好发挥生态效益^[78-80]。

4.4 探索市场补贴机制, 促进产业发展

乡土野花的生态收益除农民直接受益外, 有关产业各方乃至全社会均从中收益, 因此, 政府部门有必要通过补贴的形式承担部分栽培与开发成本。有关各方需要以健全相关产业结构与生态效果为目标, 充分重视本土化乡土野花组合对产业及生态的重要意义, 追求长期生态与经济效益, 对早期产生的开发与栽培成本, 应给予一定支持; 对农户的栽培行为, 应给予合理补贴。这一点可借鉴欧美等国家以农户为主体的农场生态环境管护制度, 综合制定补贴与促进体系。此外, 乡土野花组合的建设可进一步同景观农业建设、乡村旅游建设、农产品品质提升等项目相结合, 拓展应用场景与栽培面积, 使之尽早为中国的农业景观修复做出应有贡献。

参考文献 References

- [1] ALLAN E, MANNING P, ALT F, et al. Land use intensification alters ecosystem multifunctionality via loss of biodiversity and changes to functional composition[J]. *Ecology Letters*, 2015, 18(8): 834–843
- [2] KRUESS A, TSCHARNTKE T. Habitat fragmentation, species loss, and biological control[J]. *Science*, 1994, 264(5165): 1581–1584
- [3] ANDRÉN H, ANDREN H. Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat: A review[J]. *Oikos*, 1994, 71(3): 355
- [4] FISCHER J, LINDENMAYER D B. Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis[J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2010, 16(3): 265–280
- [5] BULLOCK J M, PYWELL R F, BURKE M J W, et al. Restoration of biodiversity enhances agricultural production[J]. *Ecology Letters*, 2010, 4(3): 185–189
- [6] ZERMEÑO-HERNÁNDEZ I, PINGARRONI A, MARTÍNEZ-RAMOS M. Agricultural land-use diversity and forest regeneration potential in human-modified tropical landscapes[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 230: 210–220
- [7] DECLER K. The new European biodiversity strategy: A challenge to the restoration community![J]. *Ecological Restoration*, 2012, 30(2): 93–94
- [8] HENDRICKX F, MAELFAIT J P, WINGERDEN W V, et al. How landscape structure, land-use intensity and habitat diversity affect components of total arthropod diversity in agricultural landscapes[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 44(2): 340–351
- [9] SCHIRMEL J, ALBRECHT M, BAUER P M, et al. Landscape complexity promotes hoverflies across different types of semi-natural habitats in farmland[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55(4): 1747–1758
- [10] DAINESE M, LUNA D I, SITZIA T, et al. Testing scale-dependent effects of semi-natural habitats on farmland biodiversity[J]. *Ecological Applications*, 2016, 25(6): 1681–1690
- [11] AVIRON S, HERZOG F, KLAUS I, et al. Effects of wildflower strip quality, quantity, and connectivity on butterfly diversity in a Swiss arable landscape[J]. *Restoration Ecology*, 2011, 19(4): 500–508
- [12] HOFFMANN U S, JAUKER F, LANZEN J, et al. Prey-dependent benefits of sown wildflower strips on solitary wasps in agroecosystems[J]. *Insect Conservation and Diversity*, 2018, 11(1): 42–49
- [13] 杨芳, 贺达汉. 生境破碎化对生物多样性的影响[J]. *生态科学*, 2006, 25(6): 564–567
YANG F, HE D H. Effects of habitat fragmentation on biodiversity[J]. *Ecologic Science*, 2006, 25(6): 564–567
- [14] 孙玉芳, 李想, 张宏斌, 等. 农业景观生物多样性功能和保护对策[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(7): 993–1001
SUN Y F, LI X, ZHANG H B, et al. Functions and countermeasures of biodiversity conservation in agricultural landscapes: A review[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(7): 993–1001
- [15] 刘云慧, 常虹, 宇振荣. 农业景观生物多样性保护一般原则探讨[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(6): 622–627
LIU Y H, CHANG H, YU Z R. General principles for biodiversity protection in agro-landscaping[J]. *Rural Eco-Environment*, 2010, 26(6): 622–627
- [16] POTTS S G, IMPERATRIZ-FONSECA V, NGO H T, et al. Safeguarding pollinators and their values to human well-being[J]. *Nature*, 2016, 540(7632): 220–229
- [17] GRASS I, ALBRECHT J, JAUKER F, et al. Much more than bees — Wildflower plantings support highly diverse flower-visitor communities from complex to structurally simple agricultural landscapes[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 225: 45–53
- [18] KORPELA E L, HYVÖNEN T, LINDGREN S, et al. Can pollination services, species diversity and conservation be simultaneously promoted by sown wildflower strips on farmland?[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 179: 18–24
- [19] CARVELL C, MEEK W R, PYWELL R F, et al. Comparing the efficacy of agri-environment schemes to enhance bumble bee abundance and diversity on arable field margins[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 44(1): 29–40
- [20] FELTHAM H, PARK K, MINDERMAN J, et al. Experimental evidence that wildflower strips increase pollinator visits to crops[J]. *Ecology and Evolution*, 2015, 5(16): 3523–3530
- [21] MCCABE E, LOEB G, GRAB H. Responses of crop pests and natural enemies to wildflower Borders depends on functional group[J]. *Insects*, 2017, 8(3): 73
- [22] BLAAUW B R, ISAACS R. Larger wildflower plantings increase natural enemy density, diversity, and biological control of sentinel prey, without increasing herbivore density[J]. *Ecological Entomology*, 2012, 37(5): 386–394
- [23] HATT S, MOUCHON P, LOPES T, et al. Effects of wildflower strips and an adjacent forest on aphids and their natural enemies in a pea field[J]. *Insects*, 2017, 8(3): 99
- [24] SCHMIDT-ENTLING M H, DÖBELI J. Sown wildflower

- areas to enhance spiders in arable fields[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 133(1): 19–22
- [25] PFIFFNER L, LUKA H, SCHLATTER C, et al. Impact of wildflower strips on biological control of cabbage lepidopterans[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 129(1): 310–314
- [26] GRAB H, POVEDA K, DANFORTH B, et al. Landscape context shifts the balance of costs and benefits from wildflower Borders on multiple ecosystem services[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2018, 285(1884): 20181102
- [27] BLAAUW B R, ISAACS R. Wildflower plantings enhance the abundance of natural enemies and their services in adjacent blueberry fields[J]. *Biological Control*, 2015, 91: 94–103
- [28] 龚汕. 苏州的花神信仰[J]. *中国道教*, 2014, (2): 62–63
GONG S. The belief of flower god in Suzhou[J]. *China Taoism*, 2014, (2): 62–63
- [29] SPOONER B. The wild flora of Kew Gardens. A cumulative checklist from 1759 by Tom Cope[J]. *Kew Bulletin*, 2012, 67(4): 855–856
- [30] 高趁光, 乔鲜果, 王孜, 等. 中国百里香草原的分布、群落特征和分类[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(9): 971–976
GAO C G, QIAO X G, WANG Z, et al. Distribution, community characteristics and classification of *Thymus mongolicus* steppe in China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(9): 971–976
- [31] 徐家星, 黄卫娟, 王建军, 等. 北京市小龙门森林公园药用植物资源调查[J]. *中央民族大学学报: 自然科学版*, 2012, 21(4): 23–30
XU J X, HUANG W J, WANG J J, et al. Investigation on medicinal plant resources in Beijing Xiaolongmen Forest Park[J]. *Journal of Minzu University of China: Natural Sciences Edition*, 2012, 21(4): 23–30
- [32] YUE C Y, HURLEY T M, ANDERSON N. Do native and invasive labels affect consumer willingness to pay for plants? Evidence from experimental auctions[J]. *Agricultural Economics*, 2011, 42(2): 195–205
- [33] HELFAND G E, SIK PARK J, NASSAUER J I, et al. The economics of native plants in residential landscape designs[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 78(3): 229–240
- [34] MORALES C L, TRAVESET A. A meta-analysis of impacts of alien vs. native plants on pollinator visitation and reproductive success of co-flowering native plants[J]. *Ecology Letters*, 2009, 12(7): 716–728
- [35] MORANDIN L A, KREMEN C. Bee preference for native versus exotic plants in restored agricultural hedgerows[J]. *Restoration Ecology*, 2013, 21(1): 26–32
- [36] 乌金双. 中国入侵植物名录[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013
WU J S. A List of Invasive Plants from China[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013
- [37] LEE B C, LEE I D, LEE H S. Effect of seeding rate (sheep fescue 70%+wildflowers 30%) on the growth characteristics, seasonal anthesis distribution and botanical composition in wildflower pastures[J]. *Journal of the Korean Society of Grassland Science*, 2011, 31(3): 96–101
- [38] UYTENBROECK R, HATT S, PIQUERAY J, et al. Creating perennial flower strips: think functional![J]. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2015, 6: 95–101
- [39] COLLINGE S K, PRUDIC K L, OLIVER J C. Effects of local habitat characteristics and landscape context on grassland butterfly diversity[J]. *Conservation Biology*, 2003, 17(1): 178–187
- [40] SPAETHE J, TAUTZ J, CHITTKA L. Visual constraints in foraging bumblebees: Flower size and color affect search time and flight behavior[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2001, 98(7): 3898–3903
- [41] KUDO G, ISHII H S, HIRABAYASHI Y, et al. A test of the effect of floral color change on pollination effectiveness using artificial inflorescences visited by bumblebees[J]. *Oecologia*, 2007, 154(1): 119–128
- [42] IDA T Y, KUDO G. Modification of bumblebee behavior by floral color change and implications for pollen transfer in *Weigela middendorffiana*[J]. *Evolutionary Ecology*, 2010, 24(4): 671–684
- [43] PLEASANTS J M, OBERHAUSER K S. Milkweed loss in agricultural fields because of herbicide use: effect on the monarch butterfly population[J]. *Insect Conservation and Diversity*, 2013, 6(2): 135–144
- [44] ROESKE C N, SEIBER J N, BROWER L P, et al. Milkweed cardenolides and their comparative processing by monarch butterflies (*Danaus plexippus* L.)[M]//*Biochemical Interaction Between Plants and Insects*. Boston, MA: Springer US, 1976: 93–167
- [45] TOIVONEN M, HUUSELA-VEISTOLA E, HERZON I. Perennial fallow strips support biological pest control in spring cereal in northern Europe[J]. *Biological Control*, 2018, 121: 109–118
- [46] BENVENUTI S, BRETZEL F. Agro-biodiversity restoration using wildflowers: What is the appropriate weed management for their long-term sustainability?[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 102: 519–526
- [47] PIQUERAY J, GILLIAUX V, DECRUYENAERE V, et al. Management of grassland-like wildflower strips sown on nutrient-rich arable soils: the role of grass density and mowing regime[J]. *Environmental Management*, 2019, 63(5): 647–657
- [48] WILLIAMS N M, WARD K L, POPE N, et al. Native wildflower plantings support wild bee abundance and diversity in agricultural landscapes across the United States[J]. *Ecological Applications*, 2015, 25(8): 2119–2131
- [49] GANSER D, KNOP E, ALBRECHT M. Sown wildflower strips as overwintering habitat for arthropods: Effective measure or ecological trap?[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 275: 123–131
- [50] BALZAN M V, BOCCI G, MOONEN A C. Utilisation of plant functional diversity in wildflower strips for the delivery of multiple agroecosystem services[J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2016, 158(3): 304–319
- [51] TSCHUMI M, ALBRECHT M, BÄRTSCHI C, et al. Perennial, species-rich wildflower strips enhance pest control and crop yield[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 220: 97–103

- [52] 房味味, 任鸿雁, 凌隼, 等. 北方草甸群落结构和组成分析及野花组合模拟构建[J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24(2): 97-103
FANG W W, REN H Y, LING J, et al. Analyses on structure and composition of northern meadow community, and simulated construction of wildflower combination[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2015, 24(2): 97-103
- [53] 蒋亚蓉, 房味味, 袁涛, 等. 野花组合景观建植综述[J]. 中国城市林业, 2016, 14(4): 5-11
JIANG Y R, FANG W W, YUAN T, et al. A review of establishing wildflower meadow landscape[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2016, 14(4): 5-11
- [54] PYWELL R F, HEARD M S, WOODCOCK B A, et al. Wildlife-friendly farming increases crop yield: evidence for ecological intensification[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2015, 282(1816): 20151740
- [55] PFISTER S C, SUTTER L, ALBRECHT M, et al. Positive effects of local and landscape features on predatory flies in European agricultural landscapes[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 239: 283-292
- [56] GANSER D, MAYR B, ALBRECHT M, et al. Wildflower strips enhance pollination in adjacent strawberry crops at the small scale[J]. Ecology and Evolution, 2018, 8(23): 11775-11784
- [57] BLAAUW B R, ISAACS R. Larger patches of diverse floral resources increase insect pollinator density, diversity, and their pollination of native wildflowers[J]. Basic and Applied Ecology, 2014, 15(8): 701-711
- [58] AAVIK T, BOSSHARD D, EDWARDS P J, et al. Fitness in naturally occurring and restored populations of a grassland plant *Lychnis flos-cuculi* in a Swiss agricultural landscape[J]. Restoration Ecology, 2014, 22(1): 98-106
- [59] ZIMMER H C, TURNER V B, MAVROMIHALIS J, et al. Forb responses to grazing and rest management in a critically endangered Australian native grassland ecosystem[J]. The Rangeland Journal, 2010, 32(2): 187
- [60] BONGAARTS J. IPBES. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services[J]. Population and Development Review, 2019, 45(3): 680-681
- [61] RICHARDS R T, CHAMBERS J C, ROSS C. Use of native plants on federal lands: policy and practice[J]. Journal of Range Management, 1998, 51(6): 625
- [62] U. S. Forest service. Native plant materials policy and authorities[EB/OL]. [2019-06-18]. https://www.fs.fed.us/wildflowers/Native_Plant_Materials/policy.html
- [63] U. S. Forest Service. Native plant materials[EB/OL]. [2019-06-18]. https://www.fs.fed.us/wildflowers/Native_Plant_Materials/
- [64] USDA. North American Pollinator Protection Campaign (NAPPC)[EB/OL]. Pollinator Partnership, [2019-06-25]. <https://www.pollinator.org/nappe/>
- [65] DELPHIA C M, O'NEILL K M, BURKLE L A. Wildflower seed sales as incentive for adopting flower strips for native bee conservation: A cost-benefit analysis[J]. Journal of Economic Entomology, 2019: DOI:10.1093/jee/toz191
- [66] OSTERMANN O P. The need for management of nature conservation sites designated under Natura 2000[J]. Journal of Applied Ecology, 2008, 35(6): 968-973
- [67] NASSAUER J I, OPDAM P. Design in science: extending the landscape ecology paradigm[J]. Landscape Ecology, 2008, 23(6): 633-644
- [68] STOATE C, BOATMAN N D, BORRALHO R J, et al. Ecological impacts of arable intensification in Europe[J]. Journal of Environmental Management, 2001, 63(4): 337-365
- [69] PYWELL R F, MEEK W R, CARVELL C, et al. The Buzz project: biodiversity enhancement on arable land under the new agri-environment schemes[J]. Delivering Arable Biodiversity, 2007, 81(3): 61-68
- [70] KROMP B, SCHMID R, ŠARAPATKA B, et al. Viennese Programme of contracted nature conservation "Biotope Farmland": Avoiding weed problems in conservation fallows by sown wildflower mixtures[C]//Bioacademy-New Developments in Science & Research on Organic Agriculture. Lenice Na Moravě, Czech Republic, 2008: 671-681
- [71] HAALAND C, NAISBIT R E, BERSIER L F. Sown wildflower strips for insect conservation: a review[J]. Insect Conservation and Diversity, 2011, 4(1): 60-80
- [72] DWIVEDI O P. Environmental policy, programmes and stewardship: An overview[M]//DWIVEDI O P. India's Environmental Policies, Programmes and Stewardship. Palgrave Macmillan, London: Springer, 1997: 212-216
- [73] England N. Environmental Stewardship[Z]. 2019: 2019
- [74] 宇振荣, 鄢文聚. "山水林田湖"共治共管 "三位一体"同护同建[J]. 中国土地, 2017, (7): 8-11
YU Z R, YUN W J. "Mountains, rivers, forests, fields and lakes" co-governance and co-management "trinity" co-protection and co-construction[J]. China Land, 2017, (7): 8-11
- [75] 王玲, 张玉钧, 赵广亮. 北京八达岭林场野生药用植物多样性特征分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(8): 202-210
WANG L, ZHANG Y J, ZHAO G L. Diversity of wild medicinal plants in Badaling forest farm[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2015, 43(8): 202-210
- [76] 李丹丹, 蒋玮, 秦岭, 等. 北京常见药用植物资源及其开发利用研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(16): 105-109
LI D D, JIANG W, QIN L, et al. Investigation and utilization of medicinal plant resources in Beijing[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(16): 105-109
- [77] 肖瑶, 刘春生, 白贞芳. 北京松山自然保护区野生药用植物资源调查[J]. 亚太传统医药, 2016, 12(19): 15-17
XIAO Y, LIU C S, BAI Z F. Investigation on wild medicinal plant resources in Songshan Nature Reserve, Beijing[J]. Asia-Pacific Traditional Medicine, 2016, 12(19): 15-17
- [78] HOLLAND A, FORBES M, FROMM D, et al. Communicative strengths in severe aphasia: the famous people protocol and its value in planning treatment[J]. American Journal of Speech-Language Pathology, 2019, 28(3): 1010-1018
- [79] PARK H J. The communicative turn in planning agency: the Presidential Commission on the National Agenda revisited[J]. Journal of the Korean Regional Development Association, 2018, 30(4): 43-70
- [80] VIGAR G. The four knowledges of transport planning: Enacting a more communicative, trans-disciplinary policy and decision-making[J]. Transport Policy, 2017, 58: 39-45